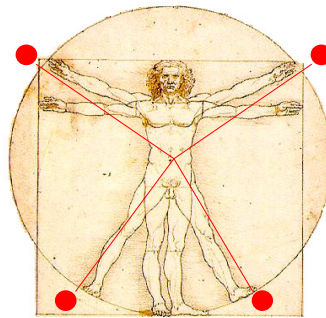


TECNOLOGÍ@ y *DESARROLLO*

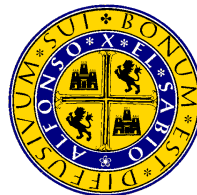
Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente

VOLUMEN III. AÑO 2005
SEPARATA



SEGUIMIENTO Y CONTROL DE LA RESTAURACIÓN DE HUMEDALES,
MEDIANTE TÉCNICAS DE RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS A
PARTIR DEL DISEÑO DE UN SISTEMA DE INDICADORES
MEDIOAMBIENTALES

A. Enrique Fernández Escalante, Manuel García Rodríguez y Fermín Villarroja
Gil.



UNIVERSIDAD ALFONSO X EL SABIO
Escuela Politécnica Superior
Villanueva de la Cañada (Madrid)

© Del texto: A. Enrique Fernández Escalante, Manuel García Rodríguez y Fermín Villarroya Gil.
Septiembre, 2005.

http://www.uax.es/publicaciones/archivos/TECEOC05_003.pdf

© De la edición: *Revista Tecnol@ y desarrollo*.
Escuela Politécnica Superior.
Universidad Alfonso X el Sabio.
28691, Villanueva de la Cañada (Madrid).
ISSN: 1696-8085
Editor: Julio Merino García, tecnologia@uax.es

No está permitida la reproducción total o parcial de este artículo, ni su almacenamiento o transmisión ya sea electrónico, químico, mecánico, por fotocopia u otros métodos, sin permiso previo por escrito de la revista.

Tecnol@ y desarrollo. ISSN 1696-8085. Vol.III. 2005.

SEGUIMIENTO Y CONTROL DE LA RESTAURACIÓN DE HUMEDALES, MEDIANTE TÉCNICAS DE RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS A PARTIR DEL DISEÑO DE UN SISTEMA DE INDICADORES MEDIOAMBIENTALES

A. Enrique Fernández Escalante ⁽¹⁾, Manuel García Rodríguez ⁽²⁾ y Fermín Villarroya Gil ⁽³⁾

(1) Dr. CC. Geológicas. TRAGSATEC. Julian Camarillo 6ºB. 28037 Madrid. Tf: 91 3226106. Fax: 91 3226005. Email: efe@tragsatec.es

(2) Dr. CC. Geológicas. Departamento de Tecnología Industrial. Escuela Politécnica Superior. Universidad Alfonso X el Sabio. Avenida de la Universidad nº 1. Villanueva de la Cañada C.P. 28691. Madrid. Tlf. 918109118. E-mail: manugaro@uax.es

(3) Dr. CC. Geológicas. Departamento de Geodinámica. Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense de Madrid. CP 28040. Tlf. 913944847. ferminv@geo.ucm.es

RESUMEN: En este artículo se analiza, sobre un entorno preoperacional específico: el dispositivo de recarga artificial de la Cubeta de Santiuste (Segovia), y la posibilidad de llevar a cabo acciones de regeneración hídrica en el Complejo de humedales de Coca-Olmedo. A partir de la caracterización inicial se ha diseñado un sistema de indicadores medioambientales para la evaluación y seguimiento, basado en el sistema Presión-Estado Respuesta (PER), diseñado de acuerdo con criterios de ingeniería ambiental. El sistema resultante es adecuado para evaluaciones de impacto ambiental, extrapolable a otros escenarios análogos y está dotado de una alta flexibilidad y adaptabilidad. Sirve además como un indicador de consecución del objetivo ante labores de restauración de elementos clave degradados, especialmente humedales, mediante labores de recarga artificial de acuíferos (AR).

PALABRAS CLAVE: Recarga artificial de acuíferos, indicadores medioambientales, evaluación de impacto ambiental (EIA), sistema PER, humedales, Complejo Coca-Olmedo, regeneración hídrica.

ABSTRACT: In this article it is analysed the possibility to carry out hydric regeneration activities on Coca-Olmedo wetlands Complex by means of the "Cubeta de Santiuste" artificial recharge of aquifers (AR) device,. From the initial stage, there has been designed a system of environmental indicators to monitor and control the evolution, based on PER system, according to general environment engineering rules. The system is suitable for environmental evaluation, can be allocated in other contexts and can be easily changed so as to improve its flexibility and effectiveness. It works as an achievement of the target indicator as well in the restoration of key elements, specially wetlands, by means of AR technics.

KEY-WORDS: Artificial recharge of aquifers, enviromental indicators, enviromental impact assesment, PER system, Coca -Olmedo wetlands Complex, hydric regeneration.

SUMARIO: 1. Introducción, 2. Metodología, 3. Diseño de indicadores medioambientales, 4. Diseño de un polígono de evaluación multicriterio, 5. Aplicación a los humedales del Complejo Coca – Olmedo, 6. Conclusiones, 7. Agradecimientos, 8. Bibliografía.

1. Introducción

Este artículo está basado en la experiencia adquirida durante las labores de recarga artificial en el acuífero superficial de la Cubeta de Santiuste (Segovia), promovidas por la Secretaría General de Desarrollo Rural del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA), y de su aplicación a dos humedales seleccionados del *Complejo Coca-Olmedo (Rey Benayas, 1991)* susceptibles de regeneración hídrica mediante operaciones de recarga artificial de acuíferos. En concreto las lagunas de las Eras y de la Iglesia, ubicadas en Villagonzalo de Coca (Segovia) (*González Bernáldez, 1989; Fdez. Escalante, 2005*).

El artículo presenta un método de evaluación de impacto ambiental, seguimiento y control en el tiempo de operaciones de recarga artificial de acuíferos (en adelante AR), y especialmente aquellas susceptibles de regenerar humedales degradados mediante operaciones de AR. Para ello se propone un sistema de indicadores medioambientales, la mayoría de diseño propio, y un polígono de evaluación multicriterial, o variograma, para sintetizar el proceso de evaluación y su seguimiento. El método permite reflejar aspectos cuantitativos, cualitativos, evolutivos, ecológicos, etc., así como la evolución cualitativa de las aguas en la zona de estudio, sea cual sea su procedencia. El estudio es una actualización de los trabajos presentados en la tesis doctoral del primer autor (*Fdez. Escalante, 2005*).

2. Métodos

Metodológicamente se ha seguido como referencia las pautas tipificadas en la legislación española y europea para la elaboración de Estudios de Impacto Ambiental (EsIA), presentada en el artículo 2 de la Ley 6/2001 de 8 de mayo, aplicando además criterios de ingeniería ambiental.

El diseño de indicadores medioambientales empleado se apoya en el sistema PER (*Friends & Raport, 1979*), sistema que diferencia indicadores de presión, estado y

respuesta. En este caso aglutina indicadores procedentes del área de la hidrogeología y del medio ambiente.

Este modelo ha sido el seguido por la mayoría de los sistemas de indicadores en la actualidad, al estar basado en un principio de causalidad, en el que las actividades humanas ejercen una presión sobre el medio ambiente; presión que puede provocar cambios en su estado. Finalmente la sociedad adopta respuestas para hacer frente a las consecuencias negativas de las presiones ejercidas (CMA-JA, 2002).

La elaboración de fichas de chequeo para la evaluación de impactos se basa en la identificación de los impactos medioambientales que operan en la zona de estudio, y en el repaso de matrices específicas de tipo Leopold encontradas en distintas fuentes bibliográficas (p.e. en Gómez Orea, 1999, Fdez. Escalante y Cordero, 2002; Fdez. Escalante y García, 2004a y d). De este modo se han chequeado la mayoría (práctica totalidad) de los impactos que operan en el medio.

El diseño de un polígono de evaluación multicriterio (variograma) que se presenta es de elaboración propia (Fdez. Escalante, 2005), y se apoya en un sistema parametrizado de tipo rangos-pesos en función de la intensidad y de los factores correctores para los impactos (acumulativos y sinérgicos).

Los indicadores ambientales han sido diseñados conforme al principio de causalidad (causa-efecto) entre los impactos identificados en distintas fases y las consecuencias previsibles. El indicador es dinámico, al marcar la evolución de una tendencia en el tiempo. Funcionan como sensores y deben quedar integrados como alternativas en el diseño de un Programa de Vigilancia y Control Ambiental de un sistema de recarga artificial. Deberían además, reflejar aspectos cuantitativos, cualitativos, evolutivos y ecológicos de los humedales, así como la evolución cualitativa de las aguas, sea cual sea su procedencia, en cada zona de estudio.

La metodología inicial se basa en la caracterización del humedal. En la tabla 1 se presenta un ejemplo de la ficha de caracterización diseñada aplicada para un caso concreto de los humedales inventariados, referida a la situación temporal de agosto de 2003 (Fdez. Escalante y García, 2004a; Fdez. Escalante, 2005). Está basada parcialmente en las ideas de valoración medioambiental propuestas por González Bernáldez (en González Bernáldez, 1989).

Dicha ficha, además de englobar toda la información precisa relativa a cada humedal, funciona como un listado de chequeo de impactos y contiene información precisa para el cálculo de determinados indicadores. La ficha ha sido estructurada del siguiente modo:

- NOMBRE. Toponimia.
- LOCALIDAD. Término municipal en el que está incluido.
- FECHA. Fecha de inventario.
- X, Y, Z. Coordenadas UTM y cota Z en msnm calculada con un MDT de un metro de precisión.
- SUSTRATO. Naturaleza del lecho del humedal.
- LAMINA_AGUA. Presencia de una lámina de agua en la fecha de inventario (agosto de 2003).
- C ($\mu\text{S/cm}$). Conductividad eléctrica del agua.
- pH.
- SALINIDAD (%). Determinación del porcentaje de salinidad en la alícuota (medición directa).
- TSD (ppm). Total de sólidos disueltos en mg/l.
- Fecha. Fecha de determinación de los parámetros inestables.
- VEG_HIDR. Presencia de vegetación hidrófila típica en el período de inventario.
- DRENAJE. Presencia de canales de drenaje del humedal (s/n).
- CULTIVOS. Presencia de cultivos en las márgenes del humedal.
- EST_CONS. Estado de conservación del 1 al 5. Los criterios son explicados en el próximo apartado.
- TIPO. Asignación de una categoría en base a su relación con acuíferos y evaluación de impacto ambiental.
- OTROS. Observaciones directas.
- AREA. Área del humedal digitalizada sobre la ortoimagen georreferenciada sobre la base de pruebas indiciales o de forma directa.
- PERIM. Perímetro del polígono digitalizado para cada humedal y zona de influencia.

Tabla 1: Ficha de caracterización de humedales diseñada específicamente como etapa previa a la aplicación del sistema de evaluación propuesto. Ejemplo de aplicación para la Laguna de la Iglesia, en Villagonzalo de Coca (Fdez. Escalante y García, 2004a; Fdez. Escalante, 2005).

IDENTIFICACIÓN	CHEQUEO
CODIGO DEL LAGO/HUMEDAL	Nº 57. SG-3

TOPONIMIA	LAGUNA DE LA IGLESIA
UNIDAD ADMINISTRATIVA	COCA
AUTONOMIA	CASTILLA-LEÓN
LOCALIDAD	VILLAGONZALO DE COCA (COCA)
HOJA 50.000	455 ARÉVALO
CUENCA	DUERO
SUBCUENCA	2229 CEDEX. Eresma Duero (Voltoya-Adaja)
HUSO:	30
COORDENADAS UTM X:	367434
Y:	4562545
Z:	798,1
TIPO	ENDORREICO Y SALINO
FIGURA DE PROTECCION	ZONA HÚMEDA CATALOGADA SG-3
FOTO AEREA	8726 (1957); 428F (1987)
ORTOIMAGEN	428 S-3 (JCL 2000).
IMAGEN SATÉLITE	Spot órbita 031, Spot 2 de órbita 032 y Landsat de órbita 202
FOTOGRAFÍA	57.jpg (anexos 4.1.2. y 4.2.2.).
RESOLUCIÓN MDT DISPONIBLE	1 METRO
ACCESO	JUNTO A LA CARRETERA DE COCA A VILLAGONZALO
CARACTERÍSTICAS	
ORIGEN GENÉTICO	CUBETA TOPOGRÁFICA
HIDRODEPENDENCIA	NO
ACUÍFEROS RELACIONADOS	NO
SOBREEXPLOTADO SI/NO	SI
CONEXIÓN CON LA RED FLUVIAL	NO
EDAFOLOGÍA DEL ENTORNO	TERRENO ARCILLOSOS Y SALINO
FACIES HIDROQUÍMICA	SECO ENTRE 2002 Y 2004. PEQUEÑO CHARCO EN CUBETA OCASIONAL
ANÁLISIS QUÍMICOS	NO
PERÍMETRO DE PROTECCIÓN	NO
VULNERABILIDAD	ALTA
VALORACIÓN PAISAJÍSTICA	4
PRESENCIA DE VEGETACIÓN	HALOFITAS
PRESENCIA DE VEGETACIÓN NITRÓFILA	SI. ORLA PERIMETRAL
MORFOMETRÍA	
EJE MAYOR	482.6 m
EJE MENOR	227.5 m

ESCALA DISPONIBLE	NO
COTA ESCALA	NO
PROFUNDIDAD MÁXIMA CUENCO	1,4 m
Profundidad máxima	0 (2004)
Perímetro máximo (m)	1209
Anchura máxima (m)	227.5
Longitud máxima (m)	482.6
Superficie máxima (km ²)	0,794
Bibliografía (antecedentes)	Rey Benayas, 1990.
ESPACIOS NATURALES PROTEGIDOS	
LIC (LUGARES DE INTERÉS)	NO
ELEMENTO CULTURAL (PATRIMONIO)	NO
ZEPa (ZONA ESPECIAL PROTECCIÓN)	NO
ZEPAS	NO
RAMSAR	NO
OTROS (AUTONÓMICO)	ZONA HÚMEDA CATALOGADA SG-3
ACTUACIONES EN EL HUMEDAL	
AFFECTADO (TIPO DE AFECCIÓN)	Descenso nivel freático por incremento de las extracciones en su área de origen
RELLENADO (AÑO)	
DRENADO (AÑO)	SI/ NO DETERMINADO
CULTIVADO (ESPECIE)	NO
RODEADO POR	CEREALES. CEBADA.
REPRESADO (AÑO)	NO
EXCAVADO	NO
DRAGADO (AÑO)	NO
EXTRACCIONES ARIDOS	NO
REGULACION	SI. DREN EN EXTREMO SUR
EXTRACCIONES AGUA	NO
SUSCEPTIBILIDAD VERTIDOS	
URBANOS	NO
INDUSTRIALES	NO
AGRÍCOLAS	SI. INDICIOS CONTAMINACIÓN DIFUSA
TIPO AGROQUÍMICOS	SI.
PESTICIDAS	SI POR ARRASTRE
USOS Y APROVECHAMIENTOS DEL	
PASTOREO	OCASIONAL
ABREVADERO	NO

ABASTECIMIENTO	NO
EXTRACCIONES Y SALIDAS	NO
APROVECHAMIENTO INDUSTRIAL	NO. SUSCEPTIBLE EMPLEO DADA SU ALTA
OTROS USOS	ESTÁTICO, PAISAJÍSTICO
USO PÚBLICO	
RECREO	NO
ACUICULTURA	SI (IMPACTO NEGATIVO POR
URBANIZADO	NO
CAZA	SI
PESCA	NO
EDUCATIVO	NO
RECREATIVO	NO
MEDICINAL	NO EN LA ACTUALIDAD
APROVECHAMIENTO VEGETACIÓN	NO
OTROS	NO
OBSERVACIONES USOS	SUSTRATO SALINO DE INTERÉS
DATOS ADMINISTRATIVOS	
PROPIEDAD	AYTO. COCA
ADMINISTRACIÓN	JCL
GRADO DE CONSERVACIÓN	4/TIPO AZUL (Fdez. Escalante, 2004)*
INSTRUCTOR/FUENTE	EFE/TESIS DOCTORAL
OBSERVACIONES	SUSCEPTIBLE MEJORA MEDIANTE RECARGA ARTIFICIAL ESTIMULADA
FECHA DEFINICIÓN	AGOSTO DE 2003

3. Diseño de indicadores medioambientales

3.1. Indicadores de presión

Reflejan las presiones directas e indirectas que las actividades humanas ejercen sobre el medio. Se evalúan por la importancia y la intensidad de las actividades humanas que pueden generar impactos ambientales.

Los indicadores de presión valoran la magnitud del impacto ambiental tras la aplicación de determinadas actuaciones, por tanto, no se miden en el medio, sino en la actuación. Se ha elegido un grupo de 10 indicadores, con el propósito de controlar las presiones directas o indirectas producidas por actividades humanas. Algunos de los indicadores

son de dudosa atribución al grupo de presión o estado, hecho que no influye en el resultado final de la evaluación.

Para alcanzar el “estado de presión” y conseguir una evaluación de impacto acertada se ha aplicado un sistema de rangos-pesos, cuya finalidad es homogeneizar la intensidad y escala de los diferentes impactos ambientales concurrentes mediante factores de corrección agregados a aquellos indicadores menos expresivos por sí mismos de la cuantía del impacto. Los impactos acumulativos y sinergismos son introducidos al sistema mediante la aplicación de factores de ponderación. Por ejemplo, el impacto de la sequía durante tres años es mayor del doble que durante dos años, etc. Este *modus operandi* es similar para los restantes grupos de indicadores PER.

En la tabla 2 se presentan los indicadores seleccionados, así como el sistema de rangos-pesos asignados. Su determinación y aplicación debe realizarse preferentemente de forma conjunta a la memoria anual de recarga artificial, al finalizar cada ciclo de recarga.

Tabla 2. Cálculo del estado de presión a partir del sistema de rangos-pesos y un factor corrector en base a impactos acumulativos y sinergismos sobre los indicadores de presión.

INDICADOR	RANGO	PESO	FACTOR CORRECTOR (SI APLICA)	TOTAL
1.- SOBREEXPLORACIÓN DE ACUÍFEROS POR EL REGADÍO.	0-25%	0/50/75/100	X1/X2/X4/X8	
2.- BALANCE DE NUTRIENTES EN LAS AGUAS DE RECARGA.	0->8	25/50/75/100		
3.- MODERNIZACIÓN Y MEJORA DE LOS DISPOSITIVOS.				0-100
4.- EFICACIA DEL USO DEL AGUA.				100-0
5.- EVALUACIÓN SOCIOECONÓMICA	< 0 >			
6.- PROCEDENCIA POLÍTICA DE LA ACTIVIDAD		PROPOSICIONES	REALIZACIONES	
7.- CERCANÍA AL DISPOSITIVO DE RECARGA.		T_i		
8.- RADIO DE INFLUENCIA		m		
9.- PRESENCIA DE ECOSISTEMAS HIDRODEPENDIENTES Y TERMODEPENDIENTES.		P/A		
10.- RELACIÓN DE LOS HUMEDALES CON OTROS ACUÍFEROS, MANANTIALES, HUMEDALES, LAGUNAS, ETC.		< 0 >		
TOTAL				

3.2. Indicadores de estado

Describen la calidad del medio y de los recursos naturales asociados a procesos de explotación socioeconómica. Reflejan los cambios provocados en el medio, y se pueden

evaluar por métodos analíticos. Permiten cuantificar la “respuesta de la actuación” (MIMAM, 1997), pueden advertir de situaciones anómalas, y constituyen una herramienta de toma de decisiones para, por ejemplo, poner en marcha un programa de emergencia, construir nuevas instalaciones, cambiar dispositivos de ubicación, etc.

Además, permiten aplicar técnicas específicas para el estudio de la variación de los parámetros en el tiempo. La técnica más viable y que ha dado buenos resultados es el análisis factorial mediante matrices de correlación (Rey Benayas et al, 2003).

En principio, se propone diseñar unos indicadores de estado a partir de la caracterización hidrogeológica del acuífero previa a la recarga artificial. Las fases técnicas inicialmente planteadas para la consecución de este objetivo son las siguientes (en Fdez. Escalante, 2002):

- Planteamiento de una ficha que describa en detalle el entorno preoperacional de los humedales hidrodépendientes (presentada en el apartado de materiales y métodos).
- Listado y posicionamiento de las obras y actuaciones antrópicas y estudio de su posible interacción sobre los humedales mediante sistemas de información geográfica.
- Planificación de un programa de seguimiento y control de la evolución de los mismos mediante una serie de indicadores medioambientales.

En la tabla 3 se muestra una relación de los 10 indicadores de estado seleccionados y los rangos - pesos asignados.

Tabla 3. Indicadores medioambientales de estado.

INDICADOR	RANGO	PESO	FACTOR CORRECTOR (SI APLICA)	TOTAL
1.- ACUÍFEROS CONTAMINADOS POR NITRATOS (A1 MIMAM):		25/50/75/100		
2.- RÍOS Y HUMEDALES CON BUENA CALIDAD SEGÚN LOS ÍNDICES BIÓTICOS (ÍNDICE BMWP) (INDICADOR A3 DEL MIMAM):	P/A	0/100		
3.- ÍNDICE DE CALIDAD GENERAL (ÍNDICE ICG) (A4 MIMAM):	E/B/I/A/I	0-100		0-100
4.- CARACTERIZACIÓN DE LA	0-201	25/50/75/100		

12. Enrique Fdez. Escalante, Manuel García y Fermín Villarroya

VULNERABILIDAD ANTE LA CONTAMINACIÓN DIFUSA (CRIPTAS)				
5.- ACUÍFEROS SALINIZADOS POR INTRUSIÓN SALINA CONTINENTAL (A2 MIMAM MODIFICADO):	0->500	25/50/75/100		
6.- SALINIZACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	0->500	25/50/75/100		
7.- EVALUACIÓN DEL VALOR DE LA TURBIDEZ Y TOTAL DE SÓLIDOS DISUELTOS (TSD) EN EL AGUA DE RECARGA.	0->30	25/50/75/100		
8.- NIVEL DEL AGUA EN LOS PIEZÓMETROS DE OBSERVACIÓN	>4-<2	25/50/75/100	x 2 si $10 < K < 100$ x 3 si $100 < K < 1000$	
9.- DIFERENCIA DE COTA MEDIA ENTRE EL NIVEL FREÁTICO Y EL NIVEL DEL AGUA DE RECARGA EN CADA UHA.	>4-<2	25/50/75/100	x 2 si $10 < K < 100$ x 3 si $100 < K < 1000$	
10.- PORCENTAJE DE FINOS EN EL SUELO. INDICADOR INICIAL DE LA COLMATACIÓN	0->20	25/50/75/100		
TOTAL				

Una vez completada la “ficha de caracterización” que engloba la mayor parte de los datos necesarios para aplicar el sistema de indicadores, se lleva a cabo la evaluación ambiental tanto en la zona de intervención como en la de actuación (espacio) referida al entorno preoperacional y a cada ciclo de recarga artificial (tiempo). De este modo se puede obtener un índice EIA específico.

Todos aquellos que precisan un cálculo plurianual para su aplicación son promediados, de modo que el valor final será la media aritmética de las sucesivas mediciones, como por ejemplo los indicadores 1 a 6 y 10 de presión. Las restantes determinaciones se llevan a cabo bien en el medio o bien en la actuación.

De todos estos indicadores (cuya descripción detallada debe ser consultada en la bibliografía para aquellos “convencionales”; o bien en *Fdez. Escalante, 2005* para los de diseño propio), se adopta a modo de ejemplo el “control y seguimiento de la colmatación del acuífero como consecuencia de las operaciones de recarga artificial”, impacto considerado el más grave para los dispositivos de AR (*Fdez. Escalante, 2005*).

Ejemplo: Diseño de un indicador medioambiental específico: Colmatación del lecho

El estudio del *cake* con lupa binocular tras el primer año de recarga artificial en la zona de estudio pone de manifiesto que la textura arenosa inicial se ve fuertemente alterada, ya que abundan las partículas finas adheridas a la superficie de los granos. Se aprecian además semillas y granos de polen, pruebas indiciales de la influencia de la actividad orgánica en el acuífero. Además, la presencia de partículas ennegrecidas por óxido induce a pensar en la influencia de la concentración de oxígeno disuelto en el sistema; y la presencia

de precipitados calcáreos se explica por la diferencia de temperaturas entre las aguas nativas y las de AR.

Algunos indicadores de colmatación han sido aplicados y verificados previamente, como el Índice de Fallo en Membrana (MFI), cuya valoración inicial para la zona de estudio en su primer ciclo de recarga artificial era de 25 a 30 s/l^2 (unidades MFI). Dada la dificultad técnica del seguimiento del indicador, por el elevado número de determinaciones necesarias y su carestía, se propone un nuevo indicador específico para la zona de estudio y escenarios análogos. Este tiene en cuenta el potencial de colmatación física y biológica, e indirectamente química, para sistemas de recarga artificial superficiales. En su determinación influyen además el carbono orgánico total (TOC) en el agua de recarga artificial, el porcentaje de arcilla inicial en el medio receptor, la superficie de infiltración, tiempo de recarga artificial (duración del ciclo), volumen recargado, caudal constante o variable, etc.

El impacto originado por todos estos factores es cuantificado mediante un sencillo indicador, que corresponde a variaciones en el porcentaje de finos en el suelo y su evolución a lo largo de cada año/ciclo de recarga artificial. Su evaluación se lleva a cabo mediante una simple granulometría, empleando un filtro de finos tipo 200 ASTM. Las muestras son tomadas en superficie y a 15 cm. de profundidad en las distintas estaciones de control del dispositivo antes y después del ciclo de AR y con una cadencia mensual durante el ciclo.

El porcentaje de finos (en peso) con respecto al valor inicial indica una variación cuantitativa. Dicha diferencia de pesada es sometida a un factor corrector. En principio se propone que sea dividido por el número de días de recarga artificial desde el inicio del ciclo (fecha en que es preceptiva una determinación) hasta la fecha de muestreo, y multiplicado por 100 para que el rango alcance un valor más cercano al de los restantes indicadores, quedando por encima de éstos, al tratarse de un indicador de los más importantes. En el ejemplo de aplicación del artículo, se ha empleado el valor medio de todas las medidas como indicador global al término del ciclo de recarga artificial para ese ciclo, que en este caso presentó una variación de 7 a 17 unidades, con una media de 14.

3.3. Indicadores de respuesta

Indican el nivel de esfuerzo social y político en materia ambiental y de recursos. Se evalúan por las decisiones y actuaciones que los agentes económicos y ambientales

realizan para proteger el medio ambiente. En la tabla 4 se presentan un grupo de 15 indicadores propuestos y las posibilidades de cálculo del sistema rangos-pesos para indicadores de respuesta, si bien, en este periodo es temprano para su determinación.

Tabla 4. Propuesta para el cálculo del estado de presión a partir del sistema de rangos-pesos sobre los indicadores de respuesta.

INDICADOR	RANGO	PESO	FACTOR CORRECTOR (SI APLICA)	TOTAL
1.- Evolución de las dimensiones del caz de recarga.				n° horas
2.- Aterramiento de canales, presas, cauces artificiales y/o naturales, etc.				± Δcm
3.- Aumento de la erosión y acaravamiento de los taludes y área de influencia.				
4.- Diferencias de cota y pendientes				2 ± Δcm
5.- Alteraciones en los parámetros hidrogeológicos.				± K, S y T
6.- Colmatación de los dispositivos, taludes y descenso de la permeabilidad del lecho.				± Δ % finos
7.- Concentración de oxígeno disuelto en los piezómetros de observación de la red de control de la recarga				± Δ O ₂ (ppm)
8.- Evolución de la calidad del agua subterránea por el uso de fertilizantes nitrogenados en el regadío.				± Δ NO ₃ (ppm)
9.- Concentración en carbonato en las aguas de recarga				± Δ CO ₃ ⁻ (ppm)
10.- Afección en cultivos dentro del área de influencia.				€/ año
11.- Afección en la vegetación nativa dentro del área de influencia.				P/A
12.- Variaciones en las condiciones ecológicas en los humedales				P/A
13.- Variaciones en el nivel del agua del cuenco en los humedales o del nivel freático en criptohumedales.				± Δcm
14.- Reducción del consumo indebido de agua				± Δ % pérdidas
15.- Balance de nutrientes en el regadío.				± Δ % sobrecargas
TOTAL				

Algunos de los indicadores de respuesta inicialmente diseñados pueden ser evaluados, mientras que otros precisan más ciclos de recarga artificial para su correcta evaluación, como pueden ser aquellos dependientes del período de residencia de agua en el acuífero.

En principio, los tres tipos de indicadores pueden ir acompañados de índices y parámetros específicos, culminando en el diseño de un sistema de indicadores calibrado y con un registro suficientemente largo para estudiar la evolución hidrogeológica y ecosistémica del ámbito de actuación. Estos podrán ser modificados a medida que varíen las condiciones de referencia, la tendencia evolutiva y el contexto de aplicación.

4. Diseño de un polígono de evaluación multicriterio específico

Se trata de un variograma parametrizado gráfico que refleje de forma intuitiva, visual, rápida y pedagógica la evolución de los aspectos cuantitativos, cualitativos y medioambientales durante y después de la recarga artificial, así como su incidencia en los factores directamente relacionados (*Barbier et al, 1994; Fdez. Escalante y Cordero, 2002, Fdez. Escalante et al, 2005*).

La asignación de un peso a cada uno de los parámetros con incidencia en el estado de los elementos evaluados permite la utilización de la matriz como indicador de estado o de presión. Esta asignación se presenta de dos maneras diferentes y consecutivas; numérica y gráfica:

Numérica. Resulta de la determinación directa y/o cálculo de los indicadores más la aplicación del sistema rangos-pesos y factores de ponderación, y permite asignar un valor global a todos los impactos concurrentes en cada ciclo o periodo de medición. El cálculo numérico para la asignación de un sistema de pesos tiene en cuenta la importancia de cada indicador, de ahí que sean previsibles ciertas variaciones al ser aplicados en distintos contextos.

Gráfica. Consiste en un variograma donde son acotados unos campos, cuya amplitud ha sido determinada en base a experiencias empíricas o criterios técnicos. De este modo cada impacto es encasillado en un escenario determinado, escenarios diseñados por su grado de afección, estableciendo una serie de campos. La representación gráfica elegida para el polígono de evaluación multicriterial ha sido un histograma de barras horizontales, de modo que cada barra engloba de 4 a 6 campos correspondientes a los baremos de cada impacto (figura 1).

La metodología propuesta es (*modificado de Fdez. Escalante et al, 2005*):

- 1) Relleno de la ficha de caracterización sintetizando la información disponible del humedal o elemento clave.
- 2) Elección de los indicadores más relevantes para cada situación específica.
- 3) Jerarquización de los indicadores de acuerdo con su magnitud.
- 4) Los intervalos del rango son explicados y establecidos de forma arbitraria en base a conceptos técnicos y una base empírica basada en la intensidad y escala de cada impacto.
- 5) Atribución del peso a cada rango del indicador (en ocasiones será subjetiva, como

- por ejemplo el indicador 3 de presión).
- 6) Atribución de un factor de ponderación o corrección a cada indicador en función de su índice de incidencia, es decir, la importancia relativa de cada indicador para el fin propuesto y la concurrencia de impactos acumulativos y sinergismos. En la práctica el factor corrector es un multiplicador para el sistema de rangos-pesos.
 - 7) Cálculo del sumatorio de los productos de la multiplicación de los rangos de cada indicador por su peso, y aplicación del factor de ponderación si procede.
 - 8) Atribución de una categoría o nivel de ponderación final a cada resultado numérico del cálculo cualitativo de rangos-pesos propuesto, dentro de las siguientes clases: despreciable (1), baja (2), moderada (3), media (4), severa (5) y alta (6).
 - 9) Obtención del variograma y de un resultado numérico final.

Con estos resultados se procede a la representación gráfica del variograma en tres etapas consecutivas:

- 1) Sombreado o coloreado de las categorías hasta el máximo nivel de ponderación. Los baremos han sido definidos para cada categoría dependiendo del indicador, si bien pueden ser modificados por el usuario (código abierto).
- 2) Trazado de la polilínea envolvente que bordea por encima los campos sombreados del polígono de evaluación multicriterio.
- 3) Estudio de la variación de este producto final a lo largo del tiempo durante el programa de seguimiento y control. De este modo las variaciones relativas permiten apreciar si los impactos progresan (migración de cualquier cambio a la derecha o elevación del número final) o las medidas correctoras funcionan adecuadamente (a la izquierda o disminución del valor numérico de evaluación multicriterial).

El diseño final del polígono de evaluación multicriterio se presenta en la tabla 5. Aunque inicialmente únicamente recoge los indicadores de estado y de presión, deja cabida a la inminente agregación de los indicadores de respuesta.

Tabla 5. Polígono de evaluación multicriterio diseñado para los humedales del Complejo Coca – Olmedo. La primera parte de la tabla corresponde a la “plantilla de resultados”. En la segunda parte se especifican las características de cada indicador, siendo: Columna 1. Impactos identificados que precisan evaluación, Columnas 2 y 3. Sistema rangos – pesos en base a su magnitud e intensidad, Columna 4 . Niveles de ponderación para impactos acumulativos y sinergismos. Los colores corresponden a estadios o grados de afección: despreciable- (verde), baja- (amarillo), moderada- (marrón), media- (rojo),

Seguimiento y control de la restauración de humedales mediante técnicas de recarga artificial de acuíferos, a partir del diseño de indicadores ... 17

severa- (gris) y alta- (morado).

INDICADORES DE ESTADO / PRESIÓN	NIVEL DE PONDERACIÓN			
	<			>
ESTADO				
1) Ríos y humedales con buena calidad según los índices bióticos (índice BMWP)				
2) Índice de calidad general (índice ICG)				
3) Acuíferos contaminados por nitratos				
4) Caracterización de la vulnerabilidad ante la contaminación difusa (CRIPTAS)				
5) Acuíferos salinizados por intrusión salina continental				
6) Salinización de las aguas subterráneas				
7) Evaluación del valor de la turbidez y Total de Sólidos Disueltos (TSD) en el agua de recarga				
8) Nivel del agua en los piezómetros de observación				
9) Diferencia de cota media entre el nivel freático y el nivel del agua de recarga en cada UHA				
10) Porcentaje de finos en el suelo. indicador inicial de la colmatación				
PRESIÓN				
1) Sobreexplotación de acuíferos por el regadío				
2) Balance de nutrientes en las aguas de recarga				
3) Modernización y mejora de los dispositivos				
4) Eficacia del uso del agua				
5) Evaluación socioeconómica				
6) Procedencia política de la actividad				
7) Cercanía al dispositivo de recarga				
8) Radio de influencia				
9) Presencia de ecosistemas hidrodépendientes y termodépendientes				
10) Relación de los humedales con otros acuíferos, manantiales, humedales, lagunas, etc.				
ESTADO				
RÍOS/HUMEDALES CON BUENA CALIDAD SEGÚN INDICES BIÓTICOS (INDICE BMWP)	RANGOS	PESOS	FACTOR CORRECTOR	TOTAL
PRESENCIA 0	> 120:	Aguas muy limpias		
AUSENCIA 100	101-120:	Aguas no contaminadas de modo sensible		

18. Enrique Fdez. Escalante, Manuel García y Fermín Villarroya

Pesos asignados de acuerdo con la diferencia de su determinación menos 100.

61-101:	Efectos evidentes de contaminación	
36-60:	Aguas contaminadas	
16-35:	Aguas muy contaminadas	
< 15:	Aguas fuertemente contaminadas	

ÍNDICE DE CALIDAD GENERAL (ÍNDICE ICG)	RANGOS	PESOS	FACTOR CORRECTOR	TOTAL
Pesos asignados de acuerdo con la diferencia de su determinación menos 100.	100-85:	Excelente		
	85-75:	Buena		
	75-65:	Intermedia		
	65-50:	Admisible		
	50-0:	Inadmisible		

ACUÍFEROS CONTAMINADOS POR NITRATOS	RANGOS	PESOS	FACTOR CORRECTOR	TOTAL
Valor máximo detectado en la zona: 284 ppm (1999) Determinación directa.	0-100:	25		
	101-150:	50		
	151-200:	75		
	> 201:	100		

VULNERABILIDAD A LOS PESTICIDAS Y PLAGUICIDAS (CRIPTAS)	RANGOS	PESOS	FACTOR CORRECTOR	TOTAL
Valores CRIPTAS medidos en la zona: 161 (1999) y 151 (2004) Determinación directa.	0-100:	25		
	101-150:	50		
	151-200:	75		
	> 201:	100		

ACUÍFEROS SALINIZADOS POR INTRUSIÓN SALINA CONTINENTAL	RANGOS	PESOS	FACTOR CORRECTOR	TOTAL
Determinación directa.	0-100:	25		
	101-200:	50		
	201-500:	75		
	> 500:	100		

SALINIZACIÓN DEL ACUÍFERO	RANGOS	PESOS	FACTOR CORRECTOR	TOTAL
Determinación directa.	0-100:	25		

Seguimiento y control de la restauración de humedales mediante técnicas de recarga artificial de acuíferos, a partir del diseño de indicadores ... 19

101-200:	50		
201-500:	75		
> 500:	100		

TURBIDEZ Y TOTAL DE SOLIDOS DISUELTOS EN EL AGUA DE RECARGA (TSS+TSD)	RANGOS	PESOS	FACTOR CORRECTOR	TOTAL
Determinación directa.	0-10 ppm:	25		
	10-20 ppm:	50		
	20-30 ppm:	75		
	> 30 ppm:	100		

NIVEL DEL AGUA EN LOS PIEZÓMETROS DE OBSERVACIÓN	RANGOS	PESOS (K med)	FACTOR CORRECTOR	TOTAL
Determinación directa. <i>Si 10 < K < 100: peso X 2</i> <i>K >=100: peso x 3</i>	>4 m vert:	25	X 2	
	de 3 a 4:	50	X 3	
	de 2 a 3:	75		
	< 2:	100		

COTA MEDIA DEL NF MENOS COTA NIVEL DEL AGUA DE RECARGA EN CADA UHA	RANGOS	PESOS (K med)	FACTOR CORRECTOR	TOTAL
Determinación directa. <i>Si 10 < K < 100: peso X 2</i> <i>K >=100: peso x 3</i>	>4 m vert:	25	X 2	
	de 3 a 4:	50	X 3	
	de 2 a 3:	75		
	< 2:	100		

PORCENTAJE DE FINOS EN EL SUELO	RANGOS	PESOS	FACTOR CORRECTOR	TOTAL
Determinación directa.	0-5%:	25		
	5-10%:	50		
	10-20%:	75		
	>20%:	100		

PRESION SOBREEXPLOTACIÓN DE ACUÍFEROS POR EL REGADÍO	RANGOS	PESOS	FACTOR CORRECTOR	TOTAL
	Recarga >>> extracciones:	0	x 1 si es el primer año de sequía	
	Recarga = extracciones - 10 %:	50	x 2 si es el segundo año	
	Recarga = extracciones - 10 a 25 %:	75	x 4 si es el tercer año seco consecutivo	

20. Enrique Fdez. Escalante, Manuel García y Fermín Villarroya

Recarga = extracciones - >25 %:	100	x 8 Asi sucesivamente	
---------------------------------	-----	--------------------------	--

BALANCE DE NUTRIENTES EN LAS AGUAS DE RECARGA	RANGOS	PESOS	FACTOR CORRECTOR	TOTAL
	0-5	25		
De 5 a 7	50			
De 7 a 8	75			
> 8	100			

MODERNIZACIÓN Y MEJORA DE LOS DISPOSITIVOS	RANGOS	PESOS	FACTOR CORRECTOR	TOTAL
Idoneidad del diseño.				
Efectividad del trazado.				
Grado de ajuste de los dispositivos empleados a los ideales para este tipo de acuíferos.				
Capacidad de pretratamiento del agua de recarga.				
Efectividad de los filtros.				
Efectividad de los dispositivos de decantación.				
Efectividad de los dispositivos de protección frente a agentes externos (avenidas, barro, etc.).				
Efectividad de los dispositivos de desoxigenación.				
Efectividad de los dispositivos anti-colmatación.				
Eficiencia de los dispositivos durante los ciclos de helada, etc.				
Evaluación final media	Media de la evaluación de 0 a 100 de los parámetros			

EFICACIA DEL USO DEL AGUA	RANGOS	PESOS	FACTOR CORRECTOR	TOTAL
Efectividad de los dispositivos de desoxigenación (máxima =0)		0*		
Efectividad de los dispositivos anti-colmatación.		0*		
Eficiencia de los dispositivos durante los ciclos de helada, etc.		0*		
Evaluación final media	Media de la evaluación de 0 a 100 de los parámetros			0

EVALUACIÓN SOCIOECONÓMICA	RANGOS	PESOS	FACTOR CORRECTOR	TOTAL
		0*		0

PROCEDENCIA POLÍTICA DE LA ACTIVIDAD	RANGOS	PESOS	FACTOR CORRECTOR	TOTAL
		0*		0

CERCANÍA AL DISPOSITIVO DE RECARGA**	RANGOS	PESOS	FACTOR CORRECTOR	TOTAL
Medido en tiempo de tránsito de las aguas subterráneas (días)	0-5:	25		
	5-10:	50		
	10-20:	75		
	>20:	100		

RADIO DE INFLUENCIA**	RANGOS	PESOS	FACTOR CORRECTOR	TOTAL
	0-100:	25		0
	101-200:	50		
	201-500:	75		
	> 500:	100		

PRESENCIA DE ECOSISTEMAS HIDRODEPENDIENTES Y TERMODEPENDIENTES**	RANGOS	PESOS	FACTOR CORRECTOR	TOTAL
PRESENCIA 0	PRESENCIA	0		0
AUSENCIA 100	AUSENCIA	100		

RELACION DE LOS HUMEDALES CON OTROS ACUÍFEROS, HUMEDALES, MANANTIALES, ETC.**	RANGOS	PESOS	FACTOR CORRECTOR	TOTAL
Variación entre medidas consecutivas del nivel del agua de humedales o caudal de los manantiales.	0-5%:	25		0
	5-10%:	50		
	10-20%:	75		
	>20%:	100		

* Pesos asignados para el primer ciclo de recarga que previsiblemente variará en ciclos posteriores.

** Indicadores que no pueden ser precisados hasta el comienzo de las actuaciones.

*** En estos ejemplos se mencionan los rangos, no los pesos correspondientes.

**** Asignación de pesos para aquellos rangos no determinados.

En resumen, el resultado final es un valor numérico del estado evolutivo de la actividad, humedal o elemento clave (índice de EIA) y una polilínea que acota por encima los campos sombreados en el diagrama, es decir, los campos incluidos en cada grado de afección. Esta polilínea, además de aportar información numérica y gráfica sobre el estado del humedal, posibilita su uso como indicador de consecución del objetivo al ser superpuesta a modo de transparencia sobre las polilíneas determinadas previamente, lo

cual permite visualizar con rapidez qué impactos han evolucionado en el tiempo.

4.1. Automatización de los resultados

El tipo de trabajo y el gran número de indicadores aplicados hace recomendable automatizar el cálculo. Para ello se ha diseñado un programa de ordenador específico que permite agregar los valores (bien determinaciones directas de campo o indirectas).

El programa guía el *input data* a lo largo del proceso de carga de información, dirigiendo la evaluación de cada indicador a una pantalla donde se explica brevemente su funcionamiento. Una vez cargados los valores, el programa aplica el sistema de rangos-pesos y los factores de corrección, generando el valor numérico y la poligonal envolvente. Su programación se ha realizado en html y Java, y se encuentra en código abierto, lo que permite modificar los valores preestablecidos para cada situación específica. En un futuro inmediato se encontrará a disposición de los técnicos interesados en Internet como complemento a este artículo tanto en español como en inglés.

5. Aplicación a los humedales del Complejo Coca - Olmedo

En este apartado se presentan los polígonos resultantes de aplicar la metodología propuesta a dos humedales del Complejo de Coca-Olmedo considerados susceptibles de mejora mediante operaciones de AR. La laguna de las Eras (Figura 1) y laguna de la Iglesia (Tabla 1 y Figura 2), en Villagonzalo de Coca. En ambos casos se han empleado las condiciones de referencia para la situación de la fecha en que fueron inventariados y caracterizados (febrero de 2004), abriendo la posibilidad de estudiar su evolución a lo largo del tiempo.

Los polígonos que se presentan están subdividido en dos partes; primeramente se estudian los indicadores de estado (diez primeros) y por otro los de presión (diez últimos), quedando supeditados los de respuesta a la obtención de datos en el futuro, tras un periodo de seguimiento tan suficientemente largo como para que sea representativo.

Figura 1. Variograma de la laguna de Las Eras, referido a febrero de 2004.

INDICADORES DE ESTADO/PRESIÓN	NIVEL DE PONDERACIÓN				
	<				>
1) Ríos y humedales con buena calidad según los índices bióticos (índice BMWP)		50****			
2) Índice de calidad general (índice ICG)		50****			
3) Acuíferos contaminados por nitratos		112			
4) Caracterización de la vulnerabilidad ante la contaminación difusa (CRIPTAS)			151		
5) Acuíferos salinizados por intrusión salina continental			458		
6) Salinización de las aguas subterráneas			458		
7) Evaluación del valor de la turbidez y Total de Sólidos Disueltos (TSD) en el agua de recarga	< 25				
8) Nivel del agua en los piezómetros de observación	3,2				
9) Diferencia de cota media entre el nivel freático y el nivel del agua de recarga en cada UHA			2,8		
10) Porcentaje de finos en el suelo. indicador inicial de la colmatación	14%				
1) Sobreexplotación de acuíferos por el regadío		50****			
2) Balance de nutrientes en las aguas de recarga		50****			
3) Modernización y mejora de los dispositivos		50****			
4) Eficacia del uso del agua		50****			
5) Evaluación socioeconómica		50****			
6) Procedencia política de la actividad		50****			
7) Cercanía al dispositivo de recarga		50****			
8) Radio de influencia		50****			
9) Presencia de ecosistemas hidrodépendientes y termodependientes		50			
10) Relación de los humedales con otros acuíferos, manantiales, humedales, lagunas, etc.		50			
					TOTAL
					1835

Figura 2. Variograma de la laguna de la Iglesia, referido a febrero de 2004.

INDICADORES DE ESTADO/PRESIÓN	NIVEL DE PONDERACIÓN			
	<			>
1) Ríos y humedales con buena calidad según los índices bióticos (índice BMWP)				100
2) Índice de calidad general (índice ICG)				100
3) Acuíferos contaminados por nitratos		112		
4) Caracterización de la vulnerabilidad ante la contaminación difusa (CRIPTAS)			151	
5) Acuíferos salinizados por intrusión salina continental			458	
6) Salinización de las aguas subterráneas			458	
7) Evaluación del valor de la turbidez y Total de Sólidos Disueltos (TSD) en el agua de recarga	< 25			
8) Nivel del agua en los piezómetros de observación	3,2			
9) Diferencia de cota media entre el nivel freático y el nivel del agua de recarga en cada UHA			2,8	
10) Porcentaje de finos en el suelo. indicador inicial de la colmatación	14%			
1) Sobreexplotación de acuíferos por el regadío.		50****		
2) Balance de nutrientes en las aguas de recarga.		50****		
3) Modernización y mejora de los dispositivos.		50****		
4) Eficacia del uso del agua.		50****		
5) Evaluación socioeconómica.		50****		
6) Procedencia política de la actividad.		50****		
7) Cercanía al dispositivo de recarga.		50****		
8) Radio de influencia.		50****		
9) Presencia de ecosistemas hidrodependientes y termodependientes.				100
10) Relación de los humedales con otros acuíferos, manantiales, humedales, lagunas, etc.				100
				TOTAL
				2035



Figuras 3 y 4. Humedales de Las Eras y La Iglesia, Villagonzalo de Coca, (Segovia).

6. Resumen y conclusiones

El sistema de indicadores de seguimiento propuesto constituye una importante novedad y diferencia los impactos que concurren sobre el entorno pre, sin y postoperacional, quedando diseñado un sistema singular para el control de las actividades de regeneración, cuya aplicación a lo largo del tiempo permitirá conocer si las actuaciones se están llevando a cabo de forma apropiada.

La atribución de algunos de los indicadores dentro de los grupos de presión o estado varía de unos autores a otros, si bien, este hecho no influye en el sistema de evaluación ambiental propuesto.

El sistema de indicadores medioambientales diferencia los impactos que concurren sobre las áreas de intervención y actuación (s), y el entorno pre, sin y postoperacional (t). Además considera el efecto de sinergismos e impactos acumulativos mediante factores de ponderación que se aplican al sistema de rangos-pesos. Se atribuyen colores a las categorías en todos los niveles de ponderación establecidos.

El dinamismo inherente a los indicadores y su tendencia a conseguir la sostenibilidad del sistema permite minimizar su carga de subjetividad. Lo más importante son los objetivos medioambientales que se persiguen, resultando cada indicador como una herramienta para la consecución de cada objetivo, y el variograma final un indicador de consecución del objetivo global: la regeneración del humedal.

Los indicadores medioambientales diseñados permitirán vigilar la evolución del acuífero, el seguimiento de la recarga artificial y su influencia en los ecosistemas asociados de una manera cuantificable con criterios objetivos.

El sistema de rangos-pesos tiene carácter matricial (relaciona factores y procesos) y requiere una readaptación continua a lo largo del tiempo en base a la información específica y los cambios detectados en el medio.

El variograma diseñado puede ser obtenido mediante la aplicación de un programa de ordenador que permita, a partir de la caracterización inicial del humedal o figura de interés especial, la aplicación de los criterios de evaluación y del sistema rangos-pesos, obteniendo como producto final el polígono de evaluación multicriterial con valor numérico y la poligonal envolvente. Este programa debe estar disponible en Internet para su acceso general y empleo por parte del técnico interesado. La diseñada por los autores se encuentra en “código abierto”, permitiendo así las modificaciones precisas para su aplicación en otros contextos. En un futuro próximo se facilitará la dirección web para su descarga.

7. Agradecimientos

A los profesores Ramón Llamas, José M.^a Rey Benayas, Juan José Sanz Donaire, José M.^a García Asensio y José Manuel Murillo por sus críticas opiniones y valiosas aportaciones.

8. Bibliografía

- BOE. (1989). *Ley 4/1989, de 27 de marzo, de conservación de los espacios naturales y de la flora y fauna silvestres*. (BOE. n.º 74, de 28 de marzo de 1989).
- BUBIER, J.L. & MOORE, T.R. (1994). “*An ecological perspective on methane emissions from northern wetlands*.” *Tree Mz*, 9 (12): 460-464.
- CASADO, S. & MONTES, C. (1995). “*Guía de los lagos y humedales de España*.” J.M. Reyero (Editor). Ed. Ecosistemas. Madrid.
- CMA.JA. (2001). “*Restauración de las reservas naturales de Laguna Honda y Laguna del Chinche. T.M. de Alcaudete (Jaén)*.” Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía-Tragsatec. Informe técnico no publicado.
- CUSTODIO, E. (2000). “*Groundwater-dependent wetlands*.” *Acta Geológica Hungarica*, 43 (2): 173-202.

- DAVIS, T.J., BLASCO, D. Y CARBONELL, M. (1996). “*Manual de la Convención de Ramsar. Una guía a la Convención sobre los Humedales de Importancia Internacional.*” Dirección General de Conservación de la Naturaleza, Madrid.
- DUGAN, P.J. (1990). “*Wetland Conservation: a Review of Current Issues and Required Action.*” IUCN, Gland, Switzerland.
- FERNÁNDEZ ESCALANTE, A.E. (2005). “*Recarga artificial de acuíferos en cuencas fluviales. Aspectos cualitativos y medioambientales. La experiencia en la Cubeta de Santiuste, Segovia*”. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid. Tomos I, II y III.
- FERNÁNDEZ ESCALANTE, A.E., (2002). “*La recarga artificial en la Cubeta de Santiuste (Segovia) Estudio de las condiciones de referencia, funcionamiento hidrogeológico y aspectos medioambientales relacionados.*” Trabajo de aspiración a la Diplomatura de Estudios Avanzados. Dpto de Geodinámica. Facultad de CC. Geológicas. Universidad Complutense de Madrid. Trabajo no publicado.
- FERNÁNDEZ ESCALANTE, A.E., & LÓPEZ, J. (2002a). “*Hydrogeological studies preceding artificial recharge of Los Arenales aquifer, Duero basin (Spain)*”. anagement of Aquifer Recharge for Sustainability, Dillon, P.J. (ed). Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, Adelaide, South Australia 22-26 September 2002. Balkema Publishers-AIH, The Netherlands.
- FERNÁNDEZ ESCALANTE, A.E., y CORDERO, R. (2002). “*Los espacios naturales protegidos frente a la Directiva Marco del agua. comentarios y proposiciones acerca de los estudios de impacto ambiental en los mismos*”. ornadas técnicas sobre la gestión y el control del agua frente a la Directiva Marco. UAM.-CYII.
- FERNÁNDEZ ESCALANTE, A.E. y GARCÍA, M. (2004a). “*Proposición de un sistema de caracterización de humedales degradados susceptibles de regeneración hídrica mediante operaciones de recarga artificial de acuíferos*”. VIII Simposio de Hidrogeología. El agua. Esencia ambiental. AEH-IGME. Octubre de 2004.
- FERNÁNDEZ ESCALANTE, A.E. Y GARCÍA, M. (2004b). “*La recarga artificial de acuíferos. Marco legal que regula sus aplicaciones*”. VIII Simposio de Hidrogeología. AEH-IGME. Octubre de 2004.
- FERNÁNDEZ ESCALANTE, A.E. Y GARCÍA, M. (2004c). “*La recarga artificial de acuíferos en el mundo. Estado de la cuestión y experiencias*”. VIII Simposio de Hidrogeología. AEH-IGME. Octubre de 2004.
- FERNÁNDEZ ESCALANTE, A.E. Y GARCÍA, M. (2004d). “*Proposición de una clasificación de humedales en base a su susceptibilidad para ser restaurados mediante operaciones de recarga artificial de acuíferos. Aplicación al sistema de humedales de Coca-Olmedo*”. VIII Simposio de Hidrogeología. AEH-IGME. Octubre de 2004.

- FERNÁNDEZ ESCALANTE, A.E. (2005). *“Recarga artificial de acuíferos en cuencas fluviales. Aspectos cualitativos y medioambientales. Criterios técnicos derivados de la experiencia en la Cubeta de Santiuste (Segovia)”*. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid. Enero de 2005.
- FERNÁNDEZ ESCALANTE, A.E., GARCÍA, M. Y VILLARROYA, F. (2005). *“Proposal for a system of environmental indicators to monitor and control artificial aquifers recharge operations based on case studies”*. ISMAR 5 proceedings. 5th International Symposium on management of aquifer recharge. Berlín, 2005 (12-16 june).
- FRIENDS, A. & RAPORT, D. (1979). *“Towards a comprehensive framework for environment statistics: stress-response approach”*. Ottawa, Canadá: Statistics Canada.
- GALE, I. (2002). *“Augmenting Groundwater Resources by Artificial Recharge (AGRAR)”*. A project funded by the British Department for International Development (DFID) and led by the British Geological Survey (BGS) in collaboration with other organisations. Duration: July 2002 to July 2005.
- GARCÍA RODRÍGUEZ, M. (2003). *“Clasificación funcional de humedales ribereños”*. Tecnología y Desarrollo. Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. Volumen I, año 2003. Universidad Alfonso X El Sabio. Escuela Politécnica Superior.
- GÓMEZ OREA, D. (1999). *“Evaluación del impacto ambiental. Un instrumento preventivo para la gestión ambiental.”* Coedición Ediciones Mundi-prensa-Editorial agrícola española, S.A. Madrid, 1999.
- GONZÁLEZ-BERNÁLDEZ, F. (1988). *“Typology of wetlands and evaluation of the resources they represent”*. Hydrology of Wetlands in Semiarid and Arid Regions. Agencia del Medio Ambiente. Sevilla: 7-36.
- GONZÁLEZ BERNÁLDEZ, F. (1989). *“Ecosistemas áridos y endorreicos españoles”*. En: zonas áridas en España: 223-238. Real Academia de Ciencias de Madrid.
- GONZÁLEZ BERNÁLDEZ, F. (1992a). *“Los paisajes del agua: terminología popular de los humedales.”* J. M. Reyero Editor, Madrid.
- GONZÁLEZ-BERNÁLDEZ, F. (1992b). *“Ecological aspects of wet-land/groundwater relationships in Spain”*. Limnética. Madrid. 8: 11-26.
- GONZÁLEZ BERNÁLDEZ, F. (1992c). *“Valores y funciones de los ecosistemas de descarga de acuíferos en Los Arenales”*. Curso de humedales de la cuenca del Duero. Hábitats de descarga de aguas subterráneas en el acuífero de Los Arenales. Actuaciones para su protección. Biblioteca de Educación Ambiental. Sección C: documentación técnica de medio-ambiente. Junta de Castilla y León.

- MAPA. (1999). “*Estudio hidrogeológico complementario para la recarga artificial en la cubeta de Santiuste (Segovia)*”. Informe técnico no publicado. Secretaría General de Desarrollo Rural-Tragsatec. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- MATTER, W.J. & MANNAN, R.W. (1988). “*Sand and gravel pits as fish and wildlife habitat in the Southwest*”. US. Fish Wildl. Serv. Resour. Publ. 171. 11 pp. <http://www.fws.gov/>
- MIMAM. (1997). “*Educación ambiental para el desarrollo sostenible.*” Serie monografías Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental.
- MOPTMA. (1990). “*Estudio de las zonas húmedas de la España peninsular. Inventario y tipificación*”. Dirección General de Obras Hidráulicas.
- MOPTMA. (1995). “*Actualización del Inventario de Zonas Húmedas*”. Dirección General de Obras Hidráulicas, Madrid. Informe interno no publicado.
- REY BENAYAS, J. M. (1990). “*Ecosistemas de descarga de acuíferos en la Cuenca del Duero*”. Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Madrid.
- REY BENAYAS, J. M. (1991). “*Aguas Subterráneas y Ecología. Ecosistemas de descarga de Acuíferos en Los Arenales*”. ICONA.-CSIC. Colección Técnica ICONA.- MAPA.
- REY BENAYAS, J.M.; ESPIGARES, T Y NICOLAU, L.M. (editores) (2003). “*Restauración de ecosistemas mediterráneos.*” Colección Aula Abierta. Universidad de Alcalá.
- SANDLUND, O.T., & VIKEN, Å. (Eds.) (1997). “*Report from Workshop on Freshwater Biodiversity*”. Selbu, Norway, 5.-7. June 1997. The Trondheim Conferences on Biodiversity.
- UNTS. (1976). “*RAMSAR, 1971. Convention on wetlands of international importance especially as waterfowl habitat*”. UNTS. Nº. 14.583. Vol. 996 (1976), pp. 243.